



## Methodology of Linear-Quadratic Control of Propulsion Complexes with Single Electric Power Systems

---

Oleksandr Pasichnyk, Valerii Shevchenko and Vitalii Budashko

EasyChair preprints are intended for rapid dissemination of research results and are integrated with the rest of EasyChair.

December 23, 2024

УДК 629.56.064.5+620.9+629.5

**МЕТОДОЛОГІЯ ЛІНІЙНО-КВАДРАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ  
ПРОПУЛЬСИВНИМИ КОМПЛЕКСАМИ З ЄДИНИМИ  
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИМИ СИСТЕМАМИ**

**Пасічник О.О.** здобувач другого рівня вищої освіти  
**В.А. Шевченко**, д.т.н., професор  
**В.В. Будашко**, д.т.н., професор  
Національний університет «Одеська морська академія»

***Анотація:** У статті, для перевірки запропонованих методів управління виконується моделювання із порівнянням ступінчастих відгуків замкненої системи на перевантаження та швидкість повороту. Спочатку проводиться перевірка моделі, а потім відбувається спостереження за тим, наскільки адекватно модель і контролер працюють разом. Моделювання стрибків швидкості показало адекватну реакцію, але швидкість обертання гвинтів АПП показала більш значущий вплив на систему, ніж орієнтація АПП. У моделюванні швидкості повороту азимутальний кут не відповідав обмеженням частоти обертання АПП. Розраховані кути досягли значень більших ніж  $2\pi$ , що за тригонометричною функцією відповідає нульовому куту. Іншими словами – спостерігається лінійна залежність від азимутального кута, що й є результатом лінеаризації. Пропонується реалізувати запропоноване рішення з точки зору отримання більш адекватної залежності від частоти обертання АПП.*

*Також було запропоновано метод розв'язки залежності між швидкостями повздовжнього руху, дрейфу та повороту, яка є результатом використання надто спрощеної моделі або вибору неправильної робочої точки доцентрової та коріолісової лінеаризації. Незважаючи на ці проблеми, моделювання показало потенціал моделі та контролера, які використовуються в таких ситуаціях. Також запропоновано кілька модифікацій для значного покращення моделі та моделювання, зокрема – впровадження планування посилення для лінеаризації реакції АПП, що призведе до більшого впливу частоти обертання гвинтів на керованість судна.*

*Ключові слова:* моделювання, підрулюючий пристрій, лінійно-квадратичний регулятор, оптимізація, комбінований пропульсивний комплекс, подвійне призначення

**METHODOLOGY OF LINEAR-QUADRATIC CONTROL OF PROPULSION  
COMPLEXES WITH SINGLE ELECTRIC POWER SYSTEMS**

**Pasichnyk O.O.** second-level graduate of higher education  
**V. Shevchenko** Dr. of Science, Professor  
**V. Budashko** Dr. of Science, Professor  
National University "Odessa Maritime Academy"

***Abstract:** To verify the proposed control methods, simulations are performed with a comparison of the step responses of the closed system to overload and turning speed. First, the model is checked, and then it is observed how well the model and the controller work together. The simulation of speed jumps showed an adequate response, but the rotation speed of the APP propellers showed a more significant effect on the system than the orientation of the APP. In the simulation of the turning speed, the azimuthal angle did not correspond to the limitations of the rotation frequency of the APP. The calculated angles reached values greater than  $2\pi$ , which corresponds to the zero angle according to the trigonometric function. In other words, a*

*linear dependence on the azimuthal angle is observed, which is the result of linearization. It is proposed to implement the proposed solution from the point of view of obtaining a more adequate dependence on the frequency of rotation of the APP.*

*A method was also proposed for solving the dependence between the longitudinal movement, drift and rotation velocities, which is the result of using an overly simplified model or choosing the wrong operating point of centripetal and Coriolis linearization. Despite these problems, the simulations showed the potential of the model and controller used in such situations. Several modifications are also proposed to significantly improve the model and simulation, in particular, the introduction of gain planning to linearize the response of the APP, which will lead to a greater influence of the propeller rotation frequency on the ship's controllability.*

**Keywords:** *modeling, thruster, linear-quadratic controller, optimization, combined propulsion complex, dual purpose*

Азимутальні підрулюючі пристрої (АПП) – це зростаючий тренд на сучасному ринку транспортних засобів морського базування (ТЗМБ). АПП являє собою гребний гвинт, встановлений у гондолі під корпусом ТЗМБ. Ця гондола здатна обертатися навколо своєї осі, що дозволяє змінювати напрямок сили, що діє на ТЗМБ. У цій роботі досліджуються можливості удосконалення алгоритмів керування масштабними моделями ТЗМБ з використанням лінійно-квадратичного принципу керування та лінеаризованої гідродинамічної на прикладі моделі багатофункціонального пропульсивного комплексу [1-4] з двома АПП у кормовій частині. Контролер використовує оцінки лінійних швидкостей та кутових швидкостей, отримані із застосуванням системи глобального позиціонування (англ. – *Global Positioning System, GPS*) та інерційних вимірювальних пристроїв (англ. – *Inertial Measurement Units, IMU*) для керування ТЗМБ. Вхідними сигналами є швидкості обертання азимутальних гвинтів і кути упорів АПП по відношенню до діаметральної площини ТЗМБ. Модель ТЗМБ нелінійна за трьома основними параметрами: доцентрова сила і сила Коріоліса, гідродинамічне демпфування і вхідні параметри АПП. Передбачається, що всі ці ефекти приблизно лінійні навколо робочих точок контролерів. Моделі сконструйовані так, щоб інтегруватися з двома різними контролерами, один з яких управляє обома АПП одночасно, а інший – з диференціальним управлінням. Для перевірки запропонованих контролерів, виконується моделювання, де порівнюються ступінчасті відгуки замкнутої системи на перевантаження та швидкість повороту. Перший для перевірки моделі, а другий для спостереження за тим, наскільки адекватно модель і контролери працюють разом [5-8]. Моделювання стрибків швидкості показало досить добру реакцію, але частота обертання гвинтів виявила більш значний вплив на систему, ніж орієнтація двигунів. При моделюванні швидкості нишпорення поведінка азимутального кута не відповідало круговим обмеженням, властивим пристрою, що обертається з відповідною частотою. Розрахункові кути досягли більших значень, ніж  $2\pi$ , що за тригонометричною функцією дає той самий результат, що й нульовий кут. Іншими словами, сили лінійно залежатимуть від азимутального кута [9-11]. Робиться висновок, що це є результатом лінеаризації виконавчих механізмів, і запропоноване рішення полягає в тому, щоб реалізувати посилення завдання для кращого пристосування до обертової поведінки АПП [12, 13]. Ще одна обставина, яка сприяє такому результату, – це розв'язка між кидками швидкості пересування, швидкістю розгойдування та швидкістю нишпорення, що прогнозується лінійним контролером. Це проблема, оскільки насправді вони матимуть певний вплив один на одного. Робиться висновок, що це результат використання надмірно спрощеної моделі або невдало обраної робочої точки

доцентрової та коріолісової лінеаризації. Незважаючи на ці проблеми, моделювання показало потенціал моделі та контролера для використання у подібних ситуаціях. Також пропонується кілька модифікацій для значного покращення моделі та симуляцій. Однією з основних змін, яку можна було б зробити, є реалізація планування посилення при лінеаризації азимутального двигуна. Це призведе до того, що швидкість обертання гребних гвинтів надаватиме більший вплив на спрямовані сили, а поведінка ТЗМБ буде більш очікувана [14, 15].

Для визначення положення, орієнтації та швидкості руху ТЗМБ потрібні відповідні системи координат. Це рухома та нерухома системи координат, які визначені у рівняннях (1) та (2). Найбільш поширене уявлення для нерухомої системи координат базується на корпусній симетрії навколо  $X_bZ_b$ -площини, приблизної симетрії навколо  $Y_bZ_b$ -площини та проєкції на  $Z_b$ -вісь відносно поверхні води, як показано на Рис. 1. Рухома система координат використовується для опису положення та орієнтації судна в глобальних координатах та кутах Ейлера як  $[x \ y \ z]^T$ . нерухома системи координат описує сили, крутні моменти, лінійні швидкості та кутові швидкості  $[X \ Y \ Z]^T$ ,  $[K \ M \ N]^T$ ,  $[u \ v \ w]^T$ , а також  $[p \ q \ r]^T$  відповідно. Рух судна можна описати шістьма ступенями свободи, які поділяються на дві категорії: поступальний рух у трьох напрямках: поздовжнє переміщення (сплеск), поперечне переміщення (дрейф) і вертикальне переміщення (підйом), а також обертальний рух навколо трьох осей: бортова хитавиця (крен), кільова хитавиця (тангаж) та нишпорення. Це стандартні позначення, які використовуються при моделюванні морських суден [16-20].

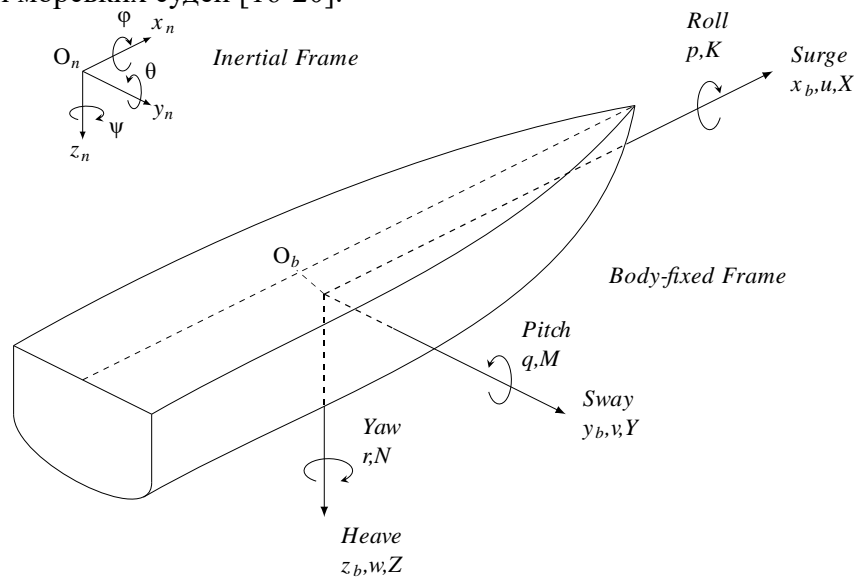


Рис. 1 Стандартні позначення опису руху судна у відповідності до (1) та (2).

Звичайне спрощення моделі полягає в тому, щоб знехтувати вертикальними рухами та поздовжньою хитавицею. Для отримання простої моделі кут крену також передбачається малим [21, 22]. Маючи це на увазі, вектор орієнтації положення і вектор лінійно-кутової швидкості можна визначити як

$$\eta \square [x \ y \ \phi]^T, \quad (1)$$

$$v \square [u \ v \ r]^T. \quad (2)$$

Лінеаризація загального випадку відбувається наступним чином. Оскільки є кілька робочих точок, які можуть бути вибрані при моделюванні, необхідний загальний випадок лінеаризації. Крім того, необхідні дві різні лінеаризації через два способи керування судном. Один з синхронним керуванням, тобто однакові вхідні сигнали для обох АПП, і один з диференціальним (асинхронним) управлінням, де АПП керуються незалежно [22, 23]. Починаючи з синхронного управління, ми використовуємо такі змінні

$$P_s = \begin{bmatrix} n_i \\ \alpha_i \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Потім (3) інтегрується до (4) з раніше згаданою змінною та узагальненою робочою точкою у вигляді  $a_s$

$$f(p) = \tau(p) = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{Na} n_i \cos(\alpha_i) \\ \sum_{i=1}^{Na} n_i \sin(\alpha_i) \\ \sum_{i=1}^{Na} n_i (\Delta_{x,i} \sin(\alpha_i) - \Delta_{y,i} \cos(\alpha_i)) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$J(p) = \sum_{i=1}^{Na} \begin{bmatrix} \cos(\alpha_i) & -n_i \sin(\alpha_i) \\ \sin(\alpha_i) & n_i \cos(\alpha_i) \\ (\Delta_{x,i} \sin(\alpha_i) - \Delta_{y,i} \cos(\alpha_i)) & (\Delta_{x,i} \sin(\alpha_i) + \Delta_{y,i} \cos(\alpha_i)) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$a_s = \begin{bmatrix} \bar{n} \\ \bar{\alpha} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

що дає наступне рівняння, яке включає постійний член:

$$L(p) = \sum_{i=1}^{Na} \begin{bmatrix} \bar{n} \cos \bar{\alpha} \\ \bar{n} \sin \bar{\alpha} \\ \bar{n} (\Delta_{x,i} \sin \bar{\alpha} - \Delta_{y,i} \cos \bar{\alpha}) \end{bmatrix} + \sum_{i=1}^{Na} \begin{bmatrix} \cos \bar{\alpha} & -\bar{n} \sin \bar{\alpha} \\ \sin \bar{\alpha} & \bar{n} \cos \bar{\alpha} \\ (\Delta_{x,i} \sin \bar{\alpha} - \Delta_{y,i} \cos \bar{\alpha}) & (\Delta_{x,i} \sin \bar{\alpha} + \Delta_{y,i} \cos \bar{\alpha}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y'n \\ \bar{\alpha} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Для досягнення бажаної проектною поведінки системи необхідний процес ітераційного моделювання та коригування відповідно до поведінки регулятора, що спостерігається, щоб знайти оптимальне значення постійних коефіцієнтів. Контролер, визначений вище, скидає стан системи в нуль, але в цьому випадку контролер повинен

слідувати заданому еталонному сигналу. Тому потрібно інтегрувати опорний сигнал  $r$  в рівняннях [24]. Це можна зробити, переписавши вхідний сигнал як

$$u(t) = -Lx(t) + L_r r(t), \quad (8)$$

де  $L_r$  вибирається таким чином, щоб статичне посилення відповідало заданому значенню. Подібний метод використання  $LQR$  було застосовано в [25]. Розроблена за означеним принципом система показана на Рис. 2.

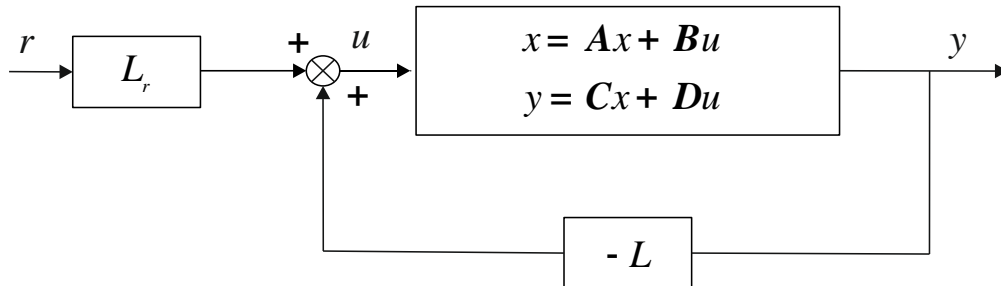


Рис. 2 Подання зворотного зв'язку та еталонного посилення системи

На рис. 3 показано основні результати роботи двох різних регуляторів. Регулятор налаштування максимального значення забезпечує перерегулювання в 7 разів вище еталонного значення, але стабілізується після 10 с.

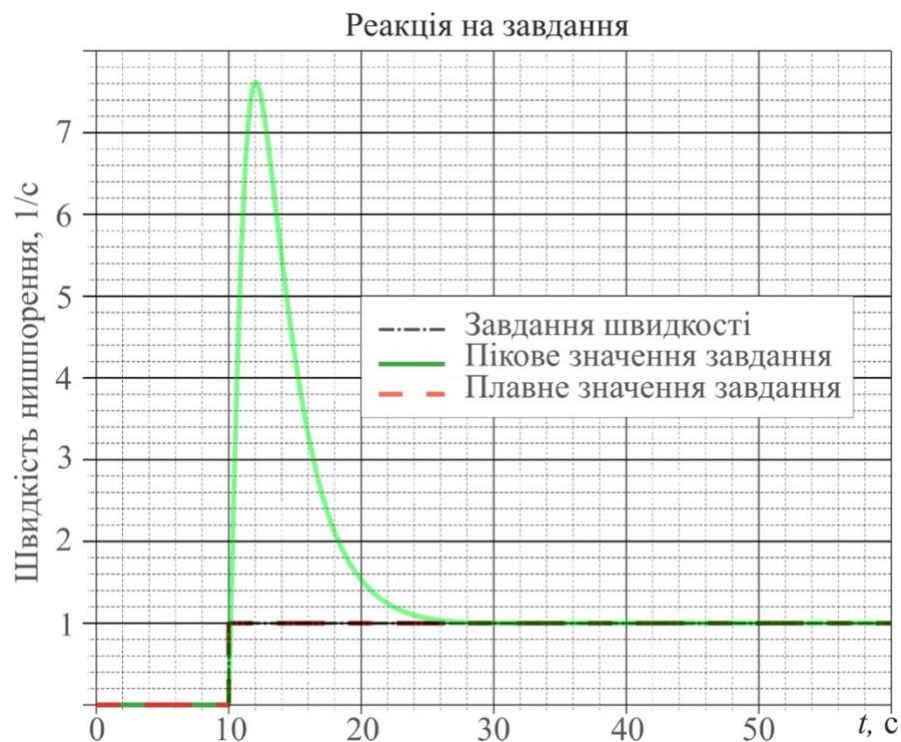


Рис. 3 Перехідна характеристика лінеаризації нульового кута

Згідно рис. 4,  $\beta$  кінцеве значення  $\alpha$  дорівнює  $\alpha_p = \alpha_s = 0.065$  рад.

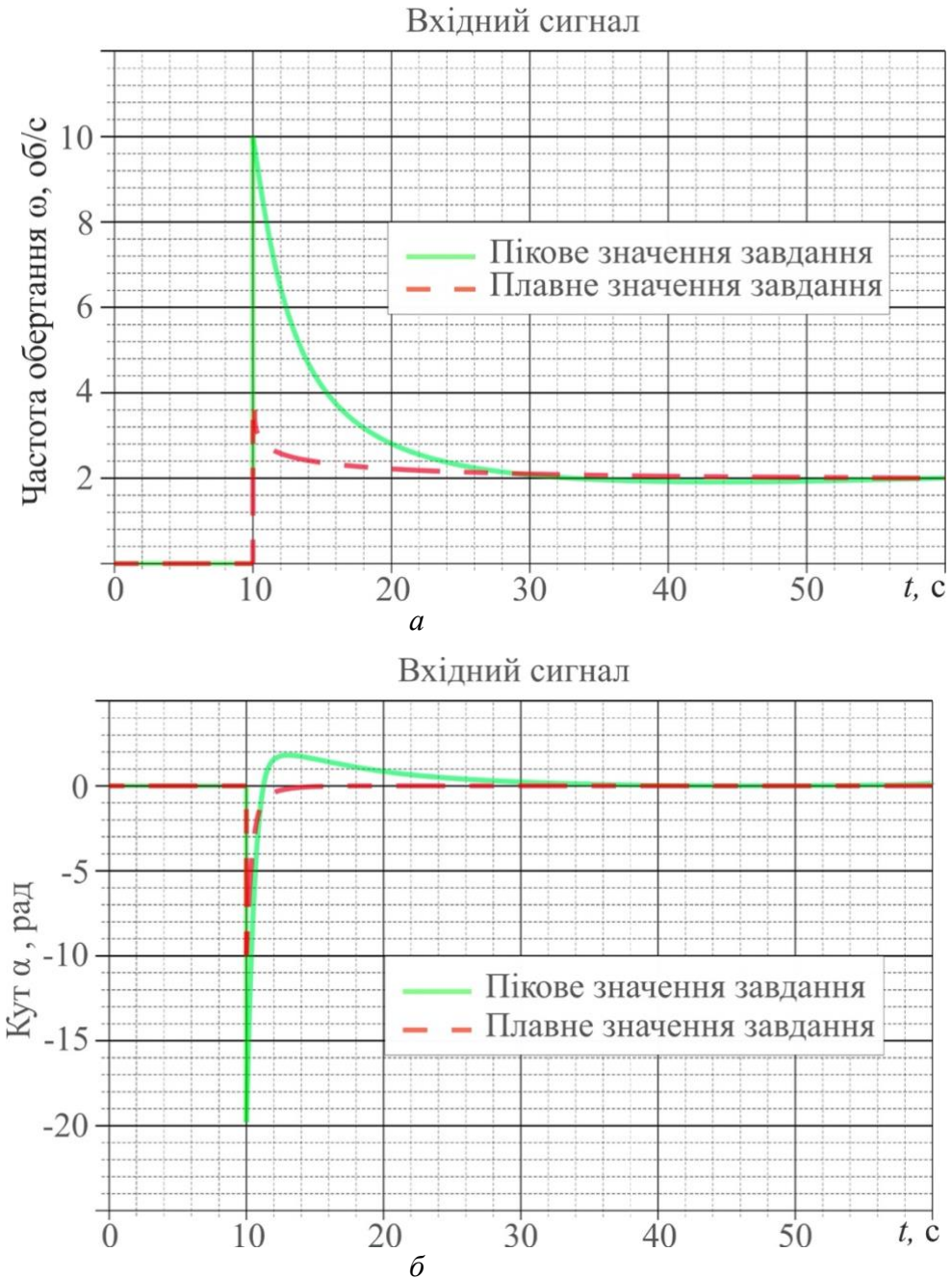


Рис. 4 Вхідні сигнали лінеаризації нульового кута:  $a$  – швидкість обертання;  $b$  – кут  $\alpha$

Найімовірніше, це результат зміни кута розташування АПП, як показано на рис. 4 ( $a$ ,  $b$ ), на якому  $\alpha$  досягає дуже високого негативного значення, близького до  $-20$  рад, що далеко від реалістичного сценарію для реального АПП.

Цей факт дає підстави переоцінювання необхідності більш різкої зміни швидкості нишпорення над повільною для протидії стану коли перерегулювання досягає такого високого значення. Однак, зменшення  $\alpha$  є доцільним з фізичної точки зору, тому що невеликий негативний кут забезпечить позитивний крутний момент навколо осі  $z$  і позитивну швидкість нишпорення. Хоча це може бути спірним моментом, якщо такий маленький кут може мати такий вплив, якщо нульовий кут дає аналогічні результати для цього режиму контролера. Іншим цікавим аспектом є те, наскільки розділені швидкість

обертання та кидки швидкості, оскільки регулятор показує однакову поведінку для обох симуляцій, що для реального АПП може суттєво вплинути на результати [26, 27].

## ЛІТЕРАТУРА

1. Andreas, A. Multivariate Modeling and Adaptive Control of Autonomous Ferries / A. Andreas, B. Morten, E. Bjørn-Olav // IFAC-PapersOnLine. – V. 54(16). – P. 395-401. Doi: [10.1016/j.ifacol.2021.10.122](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.122).
2. Budashko, V. Decision support system's concept for design of combined propulsion complexes [Text] / V. Budashko, V. Nikolskyi, O. Onishchenko, S. Khniunin / Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – V. 3. – № 8(81). – P. 10 – 21. Doi: [10.15587/1729-4061.2016.72543](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.72543).
3. Budashko, V. V. Conceptualization of research of power hybrid electric power complexes [Text] / O. V. Glazeva, V. V. Budashko, S. F. Samonov // Technology audit and production reserves. – 2016. – V. 5. – 1(31). – 63–73. Doi: [10.15587/2312-8372.2016.81407](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.81407).
4. Budashko, V. Formalization of design for physical model of the azimuth thruster with two degrees of freedom by computational fluid dynamics methods [Text] / V., Budashko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – V. 3. – № 7(87). – P. 40–49. Doi: [10.15587/1729-4061.2017.101298](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.101298).
5. Budashko, V. Theoretical-applied aspects of the composition of regression models for combined propulsion complexes based on data of experimental research [Text] / V., Budashko, V., Golikov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – V. 4. – № 3(88). – P. 11 – 20. Doi: [10.15587/1729-4061.2017.107244](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.107244).
6. Fossen, T. I. Identification of dynamically positioned ships [Text] / T. I. Fossen, S. I. Sagatun, A. J. Sørensen // Control Engineering Practice: 1999. – March. – P. 369–376. Doi: [10.1016/0967-0661\(96\)00014-7](https://doi.org/10.1016/0967-0661(96)00014-7), Marine Systems Simulator Режим доступу: \www/ URL: <http://www.marinecontrol.org/>. – 24.02.2015 р. – Загол. з екрану.
7. Gibson, J. D. Performance effects of optimal LQG eigenvalue placement in ship control [Text] / J. D. Gibson // IECON'03. 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IEEE Cat. No.03CH37468). – 2003. – V. 1. – P. 268-278. Doi: [10.1109/IECON.2003.1279991](https://doi.org/10.1109/IECON.2003.1279991).
8. Lang, X. A semi-empirical model for ship speed loss prediction at head sea and its validation by full-scale measurements / X. Lang, W. Mao // Ocean Engineering. – 2020. – V. 209. – 107494. ISSN 0029-8018. Doi: [10.1016/j.oceaneng.2020.107494](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107494).
9. Wang, Z. A gain scheduled robust linear quadratic regulator for vehicle direct yaw moment Control [Text] / Mechatronics // Z. Wang, U. Montanaro, S. Fallah, A. Sornioti, B. Lenzo. – 2018. – V. 51. – P. 31-45. ISSN 0957-4158. Doi: [10.1016/j.mechatronics.2018.01.013](https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2018.01.013).
10. Sandler, A., Budashko, V., Khniunin, S., Bogach, V. (2023). Improving the mathematical model of a fiber-optic inclinometer for vibration diagnostics of elements in the propulsion system with sliding bearings. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies: Applied physics, 5 (5(125)), 24-31. Doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.289773>.
11. Budashko, V., Sandler, A., Khniunin, S., & Bogach, V. (2024). Design of the predictive management and control system for combined propulsion complex. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(2 (131)), 90–102. Doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313627>.
12. Frković, L. Shore-to-ship: Enabling the electrification sustainability of maritime transport with the nexus between berthed cruise ships and renewables in the isolated energy systems / L. Frković, B. Čosić, A. Falkoni, T. Pukšec, N. Vladimir // Ocean Engineering. – V. 302. – 117537. ISSN 0029-8018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117537>.
13. Budashko, V. Solving a task of coordinated control over a ship automated electric power system under a changing load [Text] / V. Budashko, V. Shevchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – V. 2. – № 2(110). – P. 54-70. ISSN 1729-3774. Doi: [10.15587/1729-4061.2021.229033](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.229033).
14. Budashko, V. Diagnosis of the Technical Condition of High-tech Complexes by Probabilistic Methods [Text] / V. Budashko, A. Sandler, V. Shevchenko // International Journal on Marine Navigation



- and Safety of Sea Transportation (TransNav). – 2022. – V. 16. – № 1. – P. 105-111. ISSN 2083-6473, ISSN 2083-6481 (electronic version). Doi: [10.12716/1001.16.01.11](https://doi.org/10.12716/1001.16.01.11).
15. Atiz, A. Integrating renewable energy technologies in green ships for mobile hydrogen, electricity, and freshwater generation // A. Atiz, M. Erden, H. Karakilcik, M. Karakilcik // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2024. – V. 89. – P. 1368-1382. ISSN 0360-3199. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.09.302>.
16. Budashko, V. Thrusters physical model formalization with regard to situational and identification factors of motion modes [Text] / V. Budashko // 2020 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE), Istanbul, 12-13 June 2020, Turkey: IEEE. Pp. 1-6. Doi: [10.1109/ICECCE49384.2020.9179301](https://doi.org/10.1109/ICECCE49384.2020.9179301).
17. Budashko, V. The synthesis of control system to synchronize ship generator assemblies [Text] / V. Budashko, V. Shevchenko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2021. – V. 1. – № 2(109). – P. 45-63. ISSN 1729-3774. Doi: [10.15587/1729-4061.2021.225517](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.225517).
18. Liang, Q. A review of maritime equipment prognostics health management from a classification society perspective / Q. Liang, K. E. Knutsen, E. Vanem, V. Aesøy, H. Zhang // *Ocean Engineering*. – 2024. – V. 301. – P. 117619. ISSN 0029-8018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117619>.
19. Budashko, V. Thrusters physical model formalization with regard to situational and identification factors of motion modes [Text] / V. Budashko // *International journal of energy and environment*. – 2020. – V. 14. – P. 5-8, ISSN: 2308-1007. Doi: [10.46300/91012.2020.14.2](https://doi.org/10.46300/91012.2020.14.2).
20. Guerrero-Rodríguez, N.F. Modelling real non-linear loads for a Controller Hardware-in-the-Loop configuration to evaluate a Shunt Active Power Filter / N.F. Guerrero-Rodríguez, V. Nuñez-Ramírez, R. O. Batista-Jorge, R. Mercado-Ravelo, F.A. Ramírez-Rivera, J. A. Ferreira, E. Reyes-Archundia // *Energy Reports*. – 2024. – V. 12. – P.1947-1976. ISSN 2352-4847. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.07.056>.
21. Budashko, V. Optimization of the control system for an electric power system operating on a constant power hyperbole [Text] / V. Budashko, A. Sandler, V. Shevchenko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2022. – V. 1. – № 8(115). – P. 6-17. ISSN 1729-3774. Doi: [10.15587/1729-4061.2022.252172](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.252172).
22. Hänninen, Satu K. Development of vertical second harmonic wave loads of a large cruise ship in short and steep head waves / S. K. Hänninen, T. Mikkola, J. Matusiak // *Ocean Engineering*. – 2016. – V. 118. – P. 17-27. ISSN 0029-8018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.03.052>.
23. Budashko, V. V. Ship's power plants of combined propulsion complexes: concepts, technologies, researching: Monograph / Budashko V. V.. – Odessa: NU "OMA", 2020. – 136 p. ISBN 978-617-7857-01-2.
24. Будашко, В. В. Високовольтні технології в морській електроінженерії: монографія [Текст] / В. В. Будашко, О. М. Піпченко, В. В. Пономаренко, В. А. Шевченко // Одеса: НУ «ОМА», 2020. – 398 с. ISBN 978-617-7857-02-9.
25. Sandler, A. Improving tools for diagnosing technical condition of ship electric power installations [Text] / A. Sandler, V. Budashko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2022. – V. 5. – № 5(119). – P. 25-33. ISSN 1729-3774. Doi: [10.15587/1729-4061.2022.266267](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266267).
26. Budashko, V., Sandler, A., & Khniunin, S. (2023). Improving the method of linear-quadratic control over a physical model of vessel with azimuthal thrusters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(2 (121), 49–71. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.273934>.
27. V. Budashko, A. Sandler and O. Glazeva, "Improvement of the Predictive Control Method for the High-Level Controller," *2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv, Ukraine, 2024, pp. 294-297, Doi: <https://doi.org/10.1109/TCSET64720.2024.10755561>.